

地震動に対する地すべり地の応答特性について

東京大学農学部 川邊 洋
東京大学農学部 山口 伊佐夫

1. はじめに

地震による地すべり災害の防止のための基礎資料を得る目的で、地震動による地すべり地の応答特性の解析を試みた。観測地は静岡県由比の東倉次地区で、地下53mと地下1mのところに3成分加速度計が埋設されている。

2. 観測結果

観測期間中、中規模以上の地震はなかったので、ここでは昭和54年5月23日の小地震を取り上げる。東西方向の最大水平加速度は、地下53mで2.4gal、地下1mで4.7galであった。

それぞれの深さでのスペクトルを求め、地下53mに対する地下1mのスペクトル比を計算すると、第1図のようになる。これは厚さ52mの層の、地震波に対する増幅(減衰)作用を周波数毎に表わしたものと考えられ、ピークに当たる周波数をこの表層の固有周波数とみなすことができる。

層の構成が単純でないためピークは3~4個認められるが、3.6Hz、8.5Hz、11.5Hz付近に比較的大きなピークが見られる。どのピークに注目すればよいかは、入射する地震波の周波数構成にもよるが、地下53mのスペクトルで比較的大きな値を示すのは0~10Hzであり、中でも0~5Hzが著しいので、ここでは3.6Hzと8.5Hzのピークに注目する。

3. 地震観測地点の地盤構造

以下の解析に必要な地盤の弾性定数を求めるために板たたき法による弾性波探査を行なった。これは地上に密着させた木板(長さ約2m、幅約30cm)の側面を、地面と平行な方向にかけやでたいてS波を発生させ、水平動換振器で記録する方法である。また板を上からたたくことによって上下動換振器でP波速度も同時に測定した。

走時曲線を第2図に、次式を用いて計算した弾性定数を第1表に示す。

$$\text{ヤング率} : E = \rho \cdot \frac{V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad \text{----- 1}$$

$$\text{剛性率} : \mu = \rho V_s^2 \quad \text{----- 2}$$

$$\text{体積弾性率} : K = \rho (V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2) \quad \text{----- 3}$$

$$\text{ポアソン比} : \sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad \text{----- 4}$$

ρ : 密度, V_p : P波速度, V_s : S波速度

なお、雑微動などに妨げられるため測線距離は50mが精々で、従って速度の判定できる深さは約16~17mまでである。

4. 重複反射理論による解析

基盤層と地表層の二層構造の地盤に、S波が層に垂直に下方から入射する場合を考える。それぞれの層での波動方程式は、 $j=1$ を地表層、 $j=2$ を基盤層として次式で表わされる。

$$\rho_j \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} = \mu_j^* \frac{\partial^2 y_j}{\partial x_j^2}, \quad \mu_j^* = \mu_j + i \mu_j' = \mu_j (1 + i Q_j^{-1}) \quad \text{----- 5}$$

ρ_j : 土の密度、 y_j : 変位振幅、 t : 時間、 $i = \sqrt{-1}$

x_j : 第 j 層の上面から下方に測った深さ、 μ_j^* : 複素剛性率

μ_j : 剛性率、 μ_j^* : 動的損失、 Q_j : Q 値 (増幅に関する定数)

5 式を適当な境界条件の下で解き、入射波に対する地表層中の任意の深さ x_1 での応答倍率 (周波数応答函数) を求めると次のようになる。

$$Z(\omega, x_1) = \frac{2 \cos(k_1 x_1)}{\cos(k_1 H) + i \alpha \sin(k_1 H)} \quad \text{----- 6}$$

$$\alpha = \frac{k_1 \mu_1^*}{k_2 \mu_2^*} = \frac{\rho_1 V_{s1}^*}{\rho_2 V_{s2}^*}, \quad k_j = \frac{\omega}{V_{sj}}, \quad V_{sj}^* = \sqrt{\frac{\mu_j^*}{\rho_j}}$$

ω : 角周波数、 H : 地表層の厚さ、 V_{sj}^* : 複素 S 波速度

また、地表層と基盤層の境界面での振動記録に対する地表の振動の比は次のようになる。

$$Z_0(\omega) = \frac{1}{\cos(k_1 H)} \quad \text{----- 7}$$

ここでは 7 式を用いて解析を行なう。必要な定数は地表層の剛性率 μ 、密度 ρ 、 Q 値 Q_1 であるが、 ρ は別途実測された値を参考とし、 Q_1 は第 1 図の実測値のピークの高さに合うように試行錯誤的に求めた。 μ は第 1 表の通りであるが、観測地点の地表層を 52 m としてあるので、その間の平均的な剛性率を求めるには深さ 17 m までの値をそのままは使えない。

そこで、 $x_1=0$ と置いた場合の 6 式が極大になる ω の値 ω_p (卓越角周波数) を求めると、

$$\omega_p = \frac{(2n-1)\pi}{2} \cdot \frac{V_{s1}}{H} \quad \therefore f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{2n-1}{4} \cdot \frac{V_{s1}}{H} \quad (\text{n は正の整数}) \quad \text{----- 8}$$

f_p : 卓越周波数

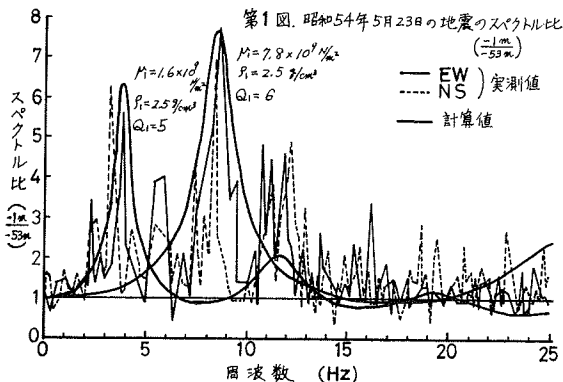
となるので、第 1 図の各ピークについて 1 次のピーク ($n=1$) として 8 式より V_{s1} を計算した。例えば、 $f_p=3.6$ Hz のピークについては $V_{s1}=750$ m/s となり、第 2 図の測定値と矛盾しない値が得られる。従って $\rho=2.5$ g/cm³ の場合は $\mu=1.4 \times 10^9$ N/m² となり、実測値に適合させた結果第 1 図では $\mu=1.6 \times 10^9$ N/m² に決定された。これらの諸定数と、それを用いた計算結果を第 1 図に実測値と共に示してある。

5. おわりに

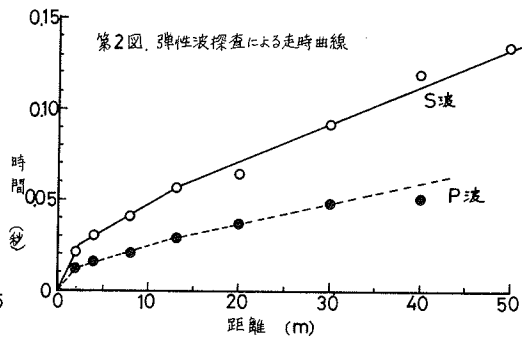
複雑な多層構造を単純な二層構造で表わすことには相当な無理があるが、一般に上述のような方法である地盤の μ 、 ρ 、 Q が決定されれば、その地盤の応答特性 (固有周波数、地震波の増幅度、地表層中の加速度、発生する剪断応力など) が 6 式をもとに計算され、更に安定計算に組み込むことができる。

層 (深さ m)	V_p m/s	V_s m/s	ヤング率 E N/m ²	剛性率 μ N/m ²	体積弾性率 K N/m ²	ポアソン比 σ
1 (0~0.8)	170	90	5.6×10^7	2.2×10^7	4.0×10^7	0.27
2 (0.8~3.6)	650	320	6.7×10^8	2.5×10^8	7.2×10^8	0.34
3 (3.6~)	900	480	1.5×10^9	5.8×10^8	1.2×10^9	0.30

第 1 表. 地震観測地点の地盤の弾性定数 ($\rho=2.5$ g/cm³ とした)



第 1 図. 昭和 54 年 5 月 23 日の地震のスペクトル比 (約 52 m)



第 2 図. 弾性波探査による走時曲線